4B

УДК 621.431.74

Р.А. Варбанец, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань, Н.И. Александровская
Одесский национальный морской университет, Украина
Украина, 65029, г. Одесса, ул. Мечникова 34

Анализ метода устранения «утечки» спектра при диагностике систем турбонаддува судовых дизелей

R.A. Varbanets, Y.N. Kucherenko, A.I. Golovan, N.I. Alexandrovskaya
Odessa National Maritime University, Ukraine
Ukraine, 65029, c.Odessa, Mechnikova st. 34

The Analysis Method for Solving the «Leakage» of the Spectrum in the Diagnosis of Marine Diesel Turbocharger Systems

Р.А. Варбанець, Ю.М. Кучеренко, А.І. Головань, Н.І. Александровська
Одеський національний морський університет, Україна
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Мечнікова 34

Аналіз методу усунення «витоку» спектра при діагностиці систем турбонаддуву судових дизелів

Дан анализ численного метода устранения эффекта «утечки» спектра, полученного в результате дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Практическое применение метода заключается в том, что он позволяет оценивать основные параметры измеряемого периодического сигнала (амплитуды и частоты) по его спектру. Анализируемый в статье метод является альтернативой применения оконных функций, подавляющих, но не исключающих эффект «утечки» спектральной мощности. В отличие от применения оконных функций, представленный в статье метод позволяет практически полностью восстановить истинные значения амплитуды и частоты сигнала по данным дискретного спектра. В статье анализируется работа предлагаемого численного метода устранения эффекта «утечки» спектральной мощности при различной степени зашумленности исходного периодического сигнала. В качестве примера взят анализатор спектра виброакустического сигнала турбины наддува судового дизеля, построенный на базе контроллера ATxmega256A3.
Ключевые слова: спектральный анализ, эффект «утечки» ДПФ, судовой дизель, турбонаддув, диагностика.

The analysis of a numerical method of solving DFT spectrum «leakage» effect is given. Practical application of a method is that with its help to become possible an assessment of key parameters of a measured periodic signal (amplitude and frequency) on its DFT spectrum. The method analyzed in article is alternative of the window functions application, but not excluding effect of «leakage» of spectral power. Unlike application of the window functions, the method presented in article allows to restore almost completely true values of amplitude and signal frequency according to a discrete spectrum. In article work of an offered numerical method of elimination of «leakage» effect of spectral power is analyzed at various degree of an initial periodic signal noise. As an example the analyzer of a vibroacoustic signal spectrum of the marine diesel turbocharger, designed on the base of the ATxmega256A3 is taken.
Key words: spectral analysis, leakage effect, marine diesel, turbocharger, diagnosis.

Наведений аналіз чисельного методу усунення ефекту «витоку» спектра, отриманого в результаті дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Практичне застосування методу полягає в тому, що з його

допомогою стає можливою оцінка основних параметрів вимірюваного періодичного сигналу (амплітуди і частоти) з його спектра. Аналізований у статті метод є альтернативою застосування віконних функцій, що пригнічують, але не виключають ефект «витоку» спектральної потужності. На відміну від застосування віконних функцій, представлений у статті метод дозволяє практично повністю відновити істинні значення амплітуди і частоти сигналу за даними дискретного спектра. У статті аналізується робота пропонованого чисельного методу усунення ефекту «витоку» спектральної потужності при різному ступені шуму вихідного періодичного сигналу. В якості прикладу взято аналізатор спектра віброакустичного сигналу турбонаддуву судового дизеля, побудований на базі контролера ATxmega256A3.
Ключові слова: спектральний аналіз, ефект «витоку» ДПФ, судовий дизель, турбонаддув, діагностика.

Введение

В сборнике трудов «Искусственный интеллект» за 2012 г. была опубликована статья [1], в которой показана возможность определения частотных характеристик современного комбинированного судового дизеля путем спектрального анализа виброакустических полей. В результате применения такого метода можно с высокой точностью определять частоту вращения ротора газотурбонагнетателя (ГТН) и коленчатого вала, а также производить диагностику технического состояния ГТН и оценку неравномерности цилиндровых мощностей. В качестве анализируемых величин рассматриваются частоты и амплитуды отдельных гармоник. В этом случае эффект «утечки мощности» спектра, построенного в результате ДПФ, приводит к существенным искажениям в определении частоты, фазы и амплитуды гармоник.

Практическому решению этой проблемы посвящено не очень много работ и основным методом, применяемым на практике в большинстве случаев, является метод оконных преобразований исходного сигнала [2]. Проблема в том, что метод оконных преобразований не исключает, а лишь уменьшает действие эффекта «утечки» мощности и искажения истинных величин амплитуды, частоты и фазы анализируемого сигнала. Другими словами, расчетные параметры исходного сигнала, которые необходимо определить путем его спектрального анализа, зависят от соотношения частоты этого сигнала и частоты дискретизации. Частота дискретизации может быть задана постоянной (как принято в большинстве технических систем), а частота анализируемого сигнала меняется произвольно. Таким образом, погрешность оценки параметров измеряемого периодического сигнала будет не постоянной и меняться вплоть до 50%. Очевидно, что без решения этой проблемы ни о каком численном количественном анализе внешних периодических сигналов с помощью ДПФ не может идти речь. Предложенный в [1] численный итерационный метод решает данную задачу. Возникает вопрос, как будет работать этот метод в случае наличия шумов в исходном сигнале?

Определение частотных характеристик и диагностика газотурбонагнетателя судового дизеля

Модуль, определяющий частотные характеристики газотурбонагнетателя судового комбинированного дизеля, построен на базе микроконтроллера ATxmega256A3 (табл. 1). Основными факторами, определяющими алгоритмы работы модуля, являются объем его оперативной памяти и параметры АЦП. Частота преобразования АЦП достаточно велика: 2MSPS, что на два порядка превышает максимально возможные частоты исходных сигналов. Объем оперативной памяти, равный 16KB, ограничивает длину ряда исходной выборки для процедуры FFT – 2048 точек.

Таблица 1 – Характеристики микроконтроллера ATxmega256A3

Flash (Kbytes):	256 Kbytes	Camera Interface:	No	picoPower:	Yes
Pin Count:	64	ADC channels:	16	Temp. Range (deg C):	-40 to 85
Max. Operating Frequency:	32 MHz	ADC Resolution (bits):	12	I/O Supply Class:	1.6 to 3.6
CPU:	8-bit AVR	ADC Speed (ksps):	2000	Operating Voltage (Vcc):	1.6 to 3.6
# of Touch Channels:	16	Analog Comparators:	4	FPU:	No
Hardware QTouch Acquisition:	No	Resistive Touch Screen:	No	MPU / MMU:	no / no
Max I/O Pins:	50	DAC Channels:	2	Timers:	7
Ext Interrupts:	50	DAC Resolution (bits):	12	Output Compare channels:	22
USB Speed:	No	Temp. Sensor:	Yes	Input Capture Channels:	22
USB Interface:	No	Crypto Engine:	AES/DES	PWM Channels:	22
SPI:	10	SRAM (Kbytes):	16	32kHz RTC:	Yes
TWI (I2C):	2	EEPROM (Bytes):	4096	Calibrated RC Oscillator:	Yes
UART:	7	Self Program Memory:	YES	Watchdog:	Yes
Graphic LCD:	No	External Bus Interface:	0		
Video Decoder:	No	DRAM Memory:	No		

В качестве примера объекта диагностирования возьмем ГТН VTR-350 главного дизеля 6L80MCE. Спектр виброакустического сигнала компрессора VTR-350 представлен на рис. 1, на котором показан диапазон интересующих информативных частот: от 100 Гц (слева от 1-й гармоники) до 5 КГц (справа от 2-й гармоники).

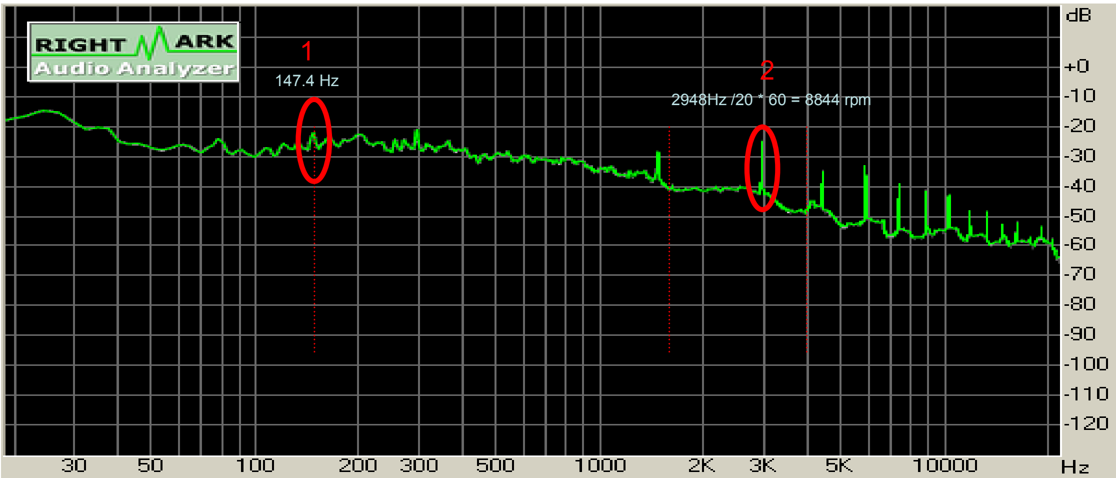


Рисунок 1 – Спектр виброакустического сигнала ГТН VTR-350

Если производить набор данных с частотой АЦП, равной 50 КГц, то получим в выборке из 2048 точек:

$$m_1 = [2048/50000] \times 100 = 4.096 \text{ периодов.}$$

$$m_2 = [2048/50000] \times 5000 = 204.8 \text{ периодов.}$$

Соответственно, записанных точек на один период:

$$p_1 = 2048 / 4.096 = 500;$$

$$p_2 = 2048 / 204.8 = 10.$$

Это количество периодов и точек на период показано для максимального и минимального по частоте исходного сигнала. На номинальной нагрузке частота измеряемого сигнала будет близка (1) к 150 Гц (±10%) и (2) к 3 кГц (±10%). В этом случае количество периодов в выборке с частотой 50 КГц будет:

$$m_1 = [2048/50000] \times 150 = 6.144 \text{ периодов.}$$

$$m_2 = [2048/50000] \times 3000 = 122.88 \text{ периодов.}$$

Записанных точек на один период:

$$p_1 = 2048 / 6.144 = 333.(3);$$

$$p_2 = 2048 / 122.8 = 16.68.$$

Такого количества периодов измеряемого сигнала в выборке и точек на один период вполне достаточно для корректного отображения информативных гармоник в дискретном спектре, построенном с помощью БПФ. Во всех случаях гарантированно выполняется требование теоремы Котельникова [2], [3].

Информативные гармоники (1 и 2, рис. 1) в спектре [4] показывают следующее:

– лопаточную частоту компрессора ГТН VTR-350 (2), определенную с помощью ограничений [1]. Ее деление на количество лопаток позволяет с большой точностью непрерывно определять текущую частоту вращения ротора ГТН, которая находится в прямо пропорциональной зависимости от эффективной мощности двигателя:

$$nTUR = 2948 \text{ Гц} / 20 * 60 = 8844 \text{ rpm};$$

– центральную гармонику (1). Ее амплитуда показывает колебания ротора на основной частоте. Повышение амплитуды этой гармоники является признаком нарастающего динамического разбаланса ротора ГТН и, соответственно, комплексным диагностическим признаком. Динамическая балансировка ротора ГТН может нарушаться в случаях дефектов подшипников, либо в случае засорения соплового аппарата, лопаток и проточной части ГТН:

$$\nu TUR = 2948 \text{ Гц} / 20 = 147.4 \text{ Гц}.$$

Устранение эффекта «утечки» в дискретном спектре

Эффект «утечки» является следствием конечности анализируемой временной реализации и ее дискретного представления через АЦП. Он считается одной из главных погрешностей дискретного преобразования Фурье.

Если частоту сигнала представить в виде

$$\gamma = M/T,$$

где T – период сигнала, а $M = n + \sigma$, где n – целое, а $0 < \sigma < 1$, то максимальные искажения амплитуды, частоты и фазы центральной гармоники и утечка мощности в соседние будет наблюдаться при $\sigma = 0.5$ [1], [2].

Таким образом, если анализировать параметры стационарного в течение выборки сигнала по его спектру, т.е. по центральной гармонике, то полученные амплитуда, частота и фаза будут искажены в случае нецелого количества отсчетов сигнала на его период. На практике для дискретной записи сигналов используют АЦП с выбранной и зафиксированной частотой дискретизации. Понятно, что число отсчетов на период никогда не будет целым, а значение σ будет меняться от 0 до 1 в зависимости от собственной частоты измеряемого сигнала, при этом будет меняться точность оценки параметров сигнала по центральной гармонике.

Для уменьшения эффекта «утечки» наиболее широкое распространение получил метод оконных преобразований: для уменьшения разрывов на краях ряда с целью ослаб-

ления утечки нужно уменьшить амплитуду сигнала возле краев. Такое масштабирование осуществляется в ходе умножения реализации на окно специальной формы $x_i^w = x_i \cdot W(i)$ (окно Хемминга, Ханнинга, Блекмена, Кайзера, и т.п.). В результате применения оконных функций спектр исходного сигнала может сильно исказиться, но при этом уменьшится зависимость амплитуды, частоты и фазы от значения σ. Это значит, что центральную гармонику x_i^w можно использовать для приблизительной оценки параметров сигнала с некоторой постоянной погрешностью, которую можно учесть. Точнее можно устранить эффект «утечки» численным методом, основанным на обработке комплексных результатов ДПФ. В [6] предложено уточнить частоту *m,* фазу *φ,* и амплитуду *A* исходного сигнала по значениям двух максимальных гармоник в спектре X_k, X_{k+1}. Для этого предлагается численно решить систему комплексных уравнений:

$$\begin{cases} \left| Z(m,\varphi)_k / Z(m,\varphi)_{k+1} \right| = \left| X_k / X_{k+1} \right| \\ Arg(Z(m,\varphi)_k) = Arg(X_k) \end{cases}, \qquad (1)$$

где параметры k-й гармоники:

$$X_k = \mathrm{Re}_k + j\,\mathrm{Im}_k\,;$$

$$X_k = NA_k e^{j\varphi_k}\,,$$

$$A_k = \frac{1}{N}\sqrt{\mathrm{Re}^2{}_k + \mathrm{Im}^2{}_k}\,,$$

$$\varphi_k = arctg\left(\frac{\mathrm{Im}_k}{\mathrm{Re}_k}\right) = Arg(X_k)\,.$$

Коэффициенты гармоник можно представить в виде: $X_k = (A_k/2)Z(m,\varphi)_k$, где $Z(m,\varphi)_k$ – комплексная функция, не зависящая от амплитуды, но зависящая от частоты и фазы:

$$Z(m,\varphi)_k = e^{j\varphi}\,\frac{e^{2\pi j(m-k)} - 1}{e^{\frac{2\pi j(m-k)}{N}} - 1} + e^{-j\varphi}\,\frac{e^{-2\pi j(m+k)} - 1}{e^{\frac{-2\pi j(m+k)}{N}} - 1}\,.$$

Систему уравнений (1) решается в том случае, если гармоники слева и справа от центральной не равны нулю, т.е. больше заданной малой величины *δ*:

$$X_{k-1} > \delta, X_{k+1} > \delta\,.$$

Система (1) решается методом итераций. После завершения итераций амплитуда сигнала определяется из соотношения:

$$A_k = Abs(2X_k / Z(m,\varphi)_k)\,.$$

Восстановление параметров зашумленного сигнала

На рис. 2 показано решение системы (1) для чистого сигнала и сигнала с добавлением 5% и 10% шумов стандартной функцией Random(). Для всех исследованных случаев требовалось не более 6-и полных итераций для обеспечения заданной погрешности менее 0.5% по частоте и фазе. Сходимость обеспечивалась во всех случаях, даже при уровне шумов 20 %. Причем, среднее количество итераций – 5 – наблюдалось для любых значений σ, от минимально выраженного эффекта «утечки» при σ ~ 0, до максимального при σ ~ 0.5. Амплитуда и частота во всех случаях были восстановлены до заданного в исходном сигнале значения (A1=0.8, w1=5.0) с точностью до 5-о знака после запятой.

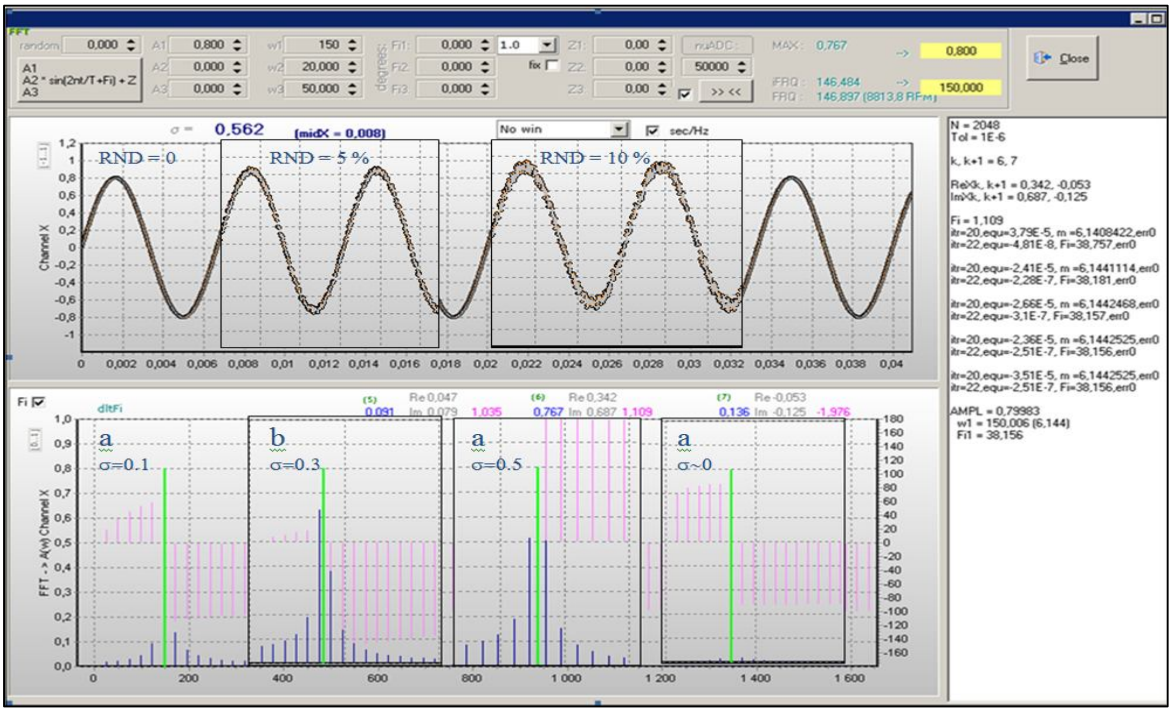


Рисунок 2 – Окно программы демонстрации ДПФ и решения проблемы «утечки»

При решении системы (1) используется много повторяющихся участков, которые удобно выделить в подпрограммы. Решение системы (1) не связано с выделением дополнительной памяти для хранения объемных массивов данных и расчетных коэффициентов, как в случае с БПФ. В связи с этим алгоритм может быть запрограммирован на современном DSP контроллере, реализующем БПФ.

Заключение

Несмотря на итерационное численное решение системы (1), эта процедура восстановления дискретного спектра незначительно увеличит общее время расчета и позволит получить не только спектр сигнала, но и восстановленное значение основной частоты и амплитуды исследуемого сигнала. Виброакустический метод определения частотных характеристик надувного судового двигателя имеет ряд преимуществ перед традиционными. В первую очередь это стоимость и простой способ инсталляции датчиков. Кроме того, постоянный анализ спектра виброскорости/ускорения блока цилиндров двигателя и ГТН дает возможность анализировать техническое состояние двигателя и газотурбонагнетателя.

Как выяснилось, предлагаемый метод восстановления дискретного спектра оказался устойчив к шумам в исходном сигнале. Это дает возможность его широкого применения в составе систем непрерывного мониторинга и диагностики современных судовых дизелей и их систем газотурбонаддува.

Литература

1. Варбанец Р.А. Комплексный контроль технического состояния судового двигателя с турбонаддувом / [Р.А. Варбанец, В.Г. Івановский, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань] // Искусственный интеллект. – 2012. – № 4. – С. 241-252.

2. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М. : Мир, 1982. – 482 с.
3. Варбанец Р.А. Анализ спектра виброакустических сигналов топливной аппаратуры средне-оборотных дизелей (СОД) / Р.А. Варбанец // Вісник Одеського національного морського університету. – 2006. – № 18 – С. 134-141.
4. RightMark Audio Analyzer [Електронний ресурс]. – Режим доступу : audio.rightmark.org

Literatura

1. Varbanets R.A. I.I., 2012. – № 4. – S. 241-252.
2. Otnes P.M. : Mir, 1982. – 482 S.
3. Varbanets R.A. Vesnik ONMU. – 2006. – № 18 – S. 134-141.
4. RightMark Audio Analyzer. audio.rightmark.org

RESUME

R.A. Varbanets, V.G. Ivanovsky, Y.N. Kucherenko, A.I. Golovan

The Analysis Method for Solving the «Leakage» of the Spectrum in the Diagnosis of Marine Diesel Turbocharger Systems

With the introduction of technology in the fleet power plants technical condition online monitoring has become topical issue of permanent continuous monitoring of key parameters regardless of the staff devices. We consider an alternative method for determining the crankshaft rotation frequency and the supercharging rpm in the system for marine diesel engine monitoring. The method is based on an analysis of the spectral characteristics of vibro-acoustic signal of the combined engine. Numerically solve the problem of eliminating the effect of «leakage» resulting from the Discrete Fourier Transform. We analyze the principle of vibro-acoustic module that implements the procedure of FFT and iterative refinement algorithm for frequency, phase and amplitude of the measured signal. The list of input, output and adjustment parameters of the module. Vibro-acoustic method for determining the frequency characteristics of inflatable marine engine has several advantages over traditional, suggesting the use of tachometers. The first is the cost of installation and simple way. Vibro-acoustic determination of the frequency characteristics of the module is not a direct alternative to tachometers used in practice, but can be used in a system of continuous monitoring and diagnosing marine diesel engines.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013.